

早稲田大学大学院 環境・エネルギー研究科

博士論文概要書

論文題目

電気バスとプラグインハイブリッドバスの
設計・試作・性能評価
ならびにそれらの適合領域明確化に関する研究
Research on a Design, Prototype Construction and
Performance Superior Domain Clarification of
Battery Electric Buses and Plug-in Hybrid Buses

申請者	
氏名	楊 翔
	Wei-hsiang Yang

研究科・研究指導
(課程内のみ)

環境・エネルギー研究科
環境・電気エネルギー研究

2018年 2月

環境・エネルギー問題への対応，ならびに公共交通車両の乗車環境改善と走行時周囲環境負荷低減を目指し，申請者は各種電気駆動バス（以後，電動バスと称す）を対象とする研究・開発に取り組んできた．電動バスは，低炭素効果や脱石油効果が高く，さらには変速ショックや騒音・振動・エミッション等も少ないため，“地球”にも“ヒト”にも優しい車両方式と言える．

この優れた電動バスであるが，現在のところ普及進度が極めて遅い．これは，車両側と充電設備側の両者について，性能面やコスト面で充分満足が出来るレベルまで技術が進展していない事が主な理由である．このような背景のもと，ここでは電動バスのさらなる普及促進を目指し，中でも特に有望視されている“電気バス”と“プラグインハイブリッドバス”を対象とする研究を進めた．具体的には，両者の設計・試作・性能評価等を通して，環境性能面での優位性と車両性能面での現状技術の限界を明確化しつつ，最終的には得られた情報を分析する事で，各種電動バス間の適合領域や，今後の技術進展に伴う適合領域拡大の程度予測を行った．本論文は以下の6章から成り立っている．

第1章では，電動バスの現状と課題をまとめ，本研究の目的を明確化した．

第2章では，電気バスを対象とする研究成果をまとめた．本方式は低炭素効果が絶大かつゼロエミッションである事から，究極の電動車両と言われている．しかし，普及促進のためには，“大きく・重たく・高価・短寿命”のバッテリーに係る各種問題を補うような車づくりと，“短時間・安全・手間いらず”のうちのうに行う事が難しい充電側に係る各種問題に配慮した運用が必要である．

これらの問題への対応として，2.2節において，申請者らの研究グループにおいて長年コンセプト提案を続けてきた“短距離走行・高頻度充電”型電気バスを対象とした研究を行った．本方式は，便毎回復充電運用によりバッテリー車載量を大幅に削減してバッテリー問題を減じるとともに，利便性の高い充電方式を採用する事で充電問題や航続距離問題にも対処するものである．ここでは，はじめに本コンセプトを採用した小型バスを例にとり詳細設計を進め，ベースディーゼル車両と同一定員を実現した電気バス“**WEB-3 Advanced**”の試作に成功した．つづいて，中型・大型電気バスを対象とした設計・性能評価も進めた．

次に，2.3節において，一日の運行距離を走破可能なバッテリーを車載する“日中走行・夜間充電”型電気バスの研究を進めた．はじめに本コンセプト採用車両の基礎設計を混合整数線形計画法に基づき行なった後に，その性能を評価した．最終的には，本コンセプト採用車両は重量制限が厳しい事から，事実上「一日運行距離」と「乗客定員」のトレードオフ設計となる事を指摘し，現状のバッテリー性能，さらにはディーゼลบাসコンバート設計の制約下においては，一日運行距離が比較的短い路線に対して導入する事のみ可能との結論を得た．

第 3 章では，前章の検討を通して試作した短距離走行・高頻度充電型電気バスを，実営業路線等へ導入してリアルワールド評価を行なった結果をまとめた．

はじめに，3.2 節において，環境性能等の評価を行い，ディーゼルバスと同等の動力性能（氷点下時含む）を確保しつつ良好な低炭素効果が得られている事を実証した．

次に，3.3 節において，車載バッテリーの劣化問題に係る研究を進め，実運用時に生じる容量劣化現象の長期間実測評価や，特殊な計測機器を使用せずとも容易に得られる情報のみから容量・内部抵抗値を推定できる簡易的手法の構築，さらには，寿命伸長のための搭載位置ローテーション法の提案等を行った．

第 4 章では，プラグインハイブリッドバスを対象とする研究成果をまとめた．本方式は，エンジンを搭載している事により航続距離の制約が無く，バッテリーも小容量で済み，さらには車両基地における夜間充電と給油のみで運用できる事から，極めて使い勝手の良い電動車両と言われている．しかし，普及促進のためには動力システム複雑化がもたらす車重増の問題に対処した車づくりと，軽油消費低減に向けたエンジン使用方法最適化が必要である．さらには，2 種のエネルギーと 2 種の走行モードが存在することで生じる車両瞬時性能変動問題等に対処できる，包括的で正確・容易な性能評価方法の構築も必要と言える．

これらの問題への対応として，4.2 節において，2 種のエネルギー（電力と燃料）を考慮しつつ，2 種の走行モード（電力消費（Charge Depleting, CD）モードと軽油消費（Charge Sustaining, CS）モード）中の瞬時性能を走行距離の関数として標記出来る性能評価手法を構築した．また，エンジンモータ併用“BLD 制御”を採用する際に，効果的なエンジンアシストが実現されているか評価できる新指標（Engine performance indicator, EPI）も提案した．最後に，実運用時において導入路線長に合わせて最適な CD モードエンジン使用方法を選択するための方法論をとりまとめた．

次に，4.3 節において，レンジエクステンダシステム搭載プラグインハイブリッド中型バスの車両設計と性能評価を行った．ここでは，はじめに最小値定理に基づき搭載機器諸元と制御方式の最適化等を行ない，最終的には，前述の本方式における 3 つの長所を有するとともに，実運用時の CD : CS モード比率においては，車重増と軽油使用に起因する環境性能悪化が顕著とならないレベルまで抑えられた車両を，シミュレータ上にて構築した．

最後に，4.4 節において，4.2 節にて検討・提案した各種性能評価方法やエンジン制御方針等を，4.3 節にて構築したプラグインハイブリッドバスシミュレータに基づき再評価した．ここでは，はじめに低炭素効果の観点から導入路線長に合わせて最適な CD モードエンジン使用方法を選択するための 2 つの提案

方策について，その妥当性を検証しつつ，最適方策を選択した際の低炭素効果を定量化した．つづいて，本研究で提案する新指標 EPI について，実機に即した状況において，その有用性を検証した．

第 5 章では，本論文において研究対象とした各種電動バスを中心に，それらの適合領域について考察した成果をまとめた．

はじめに，5.2 節において，低炭素効果の観点より電気バス/プラグインハイブリッドバス/ハイブリッドバス間に存在する適合領域について考察した．ここでは，プラグインハイブリッド方式の欠点である車重増に起因する電費や燃費の悪化現象を考慮した後に各方式の CO_2 排出率走行距離依存性を数式化し，それらの挙動を詳細に分析する事で，短距離運用側より電気バス，プラグインハイブリッドバス，ハイブリッドバスの順に良好な性能が得られる事を指摘した．また，その際に生じる性能逆転クロスポイント走行距離についても明確化した．

次に，電動バス導入ニーズが最も高い都市部高密度ダイヤ路線を対象に，5.3 節において短距離走行・高頻度充電型電気バスとプラグインハイブリッドバス間の適合領域について，また，5.4 節において日中走行・夜間充電型電気バスとプラグインハイブリッドバス間の適合領域について，さらには，5.5 節において電気バスにおける両コンセプト間の適合領域について考察した．ここでは，はじめに現状のバッテリーや充電装置の技術レベルを前提とする電気バス導入限界領域を数式化する事でプラグインハイブリッドバスとの適合領域を明確化した後，一般路線における走行距離や便間待機時間（充電時間）等の情報を考慮しつつ，ディーゼルバスの完全代替を実現できる電気バスのバッテリー性能と充電装置性能の要件について定量化した．最後に，得られた情報を国内におけるバッテリー技術開発ロードマップ等と比較する事で，各種電動バスの近未来の適合領域拡大の程度を予測した．

第 6 章では，本研究で得られた知見をまとめ，今後の課題を明らかにした．